

 Springer

**Contact Mechanics and Friction**  
Physical Principles and Applications  
(Second Edition)

# 接触力学与摩擦学的 原理及其应用

(第二版)

[德] 瓦伦丁 L. 波波夫 著  
李强 雒建斌 译

清华大学出版社



**Contact Mechanics and Friction**  
Physical Principles and Applications  
(Second Edition)

**接触力学与摩擦学的  
原理及其应用**  
(第二版)

[德] 瓦伦丁 L. 波波夫 著  
李强 雒建斌 译

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书将摩擦学问题与经典力学结合起来,既反映了摩擦学领域接触、黏着、毛细力、摩擦、弹流润滑和微动磨损等问题的研究进展,又介绍了摩擦学研究的新成果,包括基本参数的估算、解析复杂问题的数值仿真、纳米摩擦、解决摩擦学问题的动力学方法等。与第一版相比,第二版新增了各种接触、微动磨损等问题的求解,还重新编写了弹性流体润滑等内容。

本书适合高校和科研院所机械、材料、力学等专业的师生和研究人员参考,也可供相关生产企业的技术人员阅读。

First published in English under the title

Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications (2nd ed.) by Valentin L. Popov

Copyright © 2010, 2017 Springer-Verlag GmbH Germany

This edition has been translated and published under licence from Springer-Verlag GmbH.

本书中文简体字翻译版由德国施普林格公司授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2018-7247

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

接触力学与摩擦学的原理及其应用/(德)瓦伦丁 L.波波夫著;李强,雒建斌译.  
—2版.—北京:清华大学出版社,2019

书名原文:Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications  
ISBN 978-7-302-51971-3

I. ①接… II. ①瓦… ②李… ③雒… III. ①接触应力—力学 ②摩擦—理论  
IV. ①O343.3 ②O313.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 295513 号

责任编辑:黎强  
封面设计:何凤霞  
责任校对:赵丽敏  
责任印制:丛怀宇

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:155mm×235mm 印 张:21 字 数:353千字

版 次:2011年10月第1版 2019年1月第2版 印 次:2019年1月第1次印刷

定 价:79.00元

产品编号:077395-01

## 作者简介



**Valentin L. Popov (瓦伦丁 L. 波波夫)** 1985 年于国立莫斯科罗蒙诺索夫大学 (Moscow State Lomonosov University) 获得物理学博士学位, 1985—1998 年在俄罗斯科学院强度物理学研究所 (Institute of Strength Physics of the Russian Academy of Sciences) 担任研究员, 1997 年成为托木斯克国立大学 (Tomsk State University) 教授, 1998—2002 年为德国帕德伯恩大学 (University of Paderborn) 理论物理学客座教授, 从 2002 年开始, 在柏林工业大学

(Berlin University of Technology) 力学研究所 (Institute of Mechanics) 领导动力摩擦部门。

研究领域十分广泛, 包括摩擦学 (tribology)、纳米摩擦学 (nanotribology)、低温摩擦学 (tribology at low temperatures)、流变学 (rheology)、橡胶摩擦学 (tribology of rubber)、生物摩擦学 (biotribology)、材料科学 (material science)、黏弹性介质理论 (theory of elastoplastic media)、塑性物理学 (physics of plasticity)、形状记忆合金 (shape memory alloys), 以及采用超声波研究摩擦力的影响、摩擦过程的数值模拟、地震研究等。发表论文 100 多篇, 曾 10 多次组织召开关于摩擦学的国际性学术会议, 并担任大会主席或副主席, 在国际上具有广泛的影响力, 担任国际著名杂志的编辑, 是机械工程领域知名的学者。

## 译者简介

**李强** 男,1985年出生,2003—2010年就读于华东理工大学机械设计及理论专业,研究工程摩擦学,2014年于德国柏林工业大学获得博士学位,现为柏林工业大学摩擦学与系统动力学组博士后,负责摩擦与接触问题的数值仿真课程教学,主要研究接触力学与摩擦,已发表论文30余篇,发文期刊包括 *Physical Review Letters* 和 *Scientific Reports* 等。其导师 Popov 教授为本书作者。

**雒建斌** 男,1961年出生,中国科学院院士,清华大学研究员,博士生导师。1994年在清华大学获博士学位,2000年成为研究员,2002年被聘为长江学者奖励计划特聘教授,2011年当选为中国科学院院士,现任清华大学机械学院院长兼机械工程系主任,清华大学天津高端装备研究院院长,兼任国际摩擦学理事会执委,全球工学院院长委员会(GEDC)执委。曾任国际摩擦学会副主席、IFTtoMM摩擦学技术委员会主席、中国机械工程学会摩擦学分会主任。曾担任国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目首席科学家、国家自然科学基金重大项目负责人、国家自然科学基金优秀群体项目负责人。先后获得国家自然科学二等奖、国家科技进步二等奖、国家技术发明三等奖和省部级科技奖10余项。已发表论文300余篇,其中SCI收录270余篇,获发明专利授权60余件。在国际学术会议上作大会报告和主题报告20余次。兼任 *Friction* 期刊主编。在薄膜润滑、超滑和纳米制造方面开展了多年研究。

## 中文第一版译者按

本书是德国柏林工业大学波波夫(V. L. Popov)教授根据自己的科研和教学经验编写而成的。波波夫教授是摩擦力学专家,在该领域取得了诸多重要成果,书中包含了作者多年的科研成果与教学中所积累的经验,其特色是将接触力学和摩擦学进行关联和结合,既反映了这方面的基础知识,又融入了作者多年来的研究进展,体现了作者优秀的教学方法和思路。因此,这是一本很好地从接触力学角度认识摩擦学的专著,对深入了解摩擦学是很有帮助的。

接触与摩擦二者联系紧密,在工程实际应用中是非常普遍的问题。了解界面之间的相互作用机理并加以应用,这是从事机械、力学等方面的科研和工程技术应用的热点课题之一。接触力学与摩擦学涵盖面广泛,包括了弹塑性理论、黏弹性理论、材料科学、热力学、流体力学和系统动力学等学科,研究的尺度涵盖微观的纳米级到宏观的地震科学。本书不仅阐述了接触、黏着、毛细力、摩擦、润滑和磨损等一般现象,而且重点介绍了摩擦学中一些参数的粗略估算方法、许多复杂问题的简化解析计算方法和多种数值仿真方法;同时,作者还讨论了摩擦学中的系统动力学问题,如尖叫声及其抑制、失稳和空间形态等。此外,作者还论述了“橡胶摩擦”现象,这一现象在许多技术领域中都有重要的应用价值。

本书的另一特点是给出了一些针对性很强的练习题和相应的求解过程,这不仅有助于读者加深对接触力学和摩擦学的了解,也有助于从事相关技术开发和研究的工程技术人员解决具体的技术问题。因此,本书既可以作为机械、力学等专业的研究生教材或辅助教材,也适合从事相关领域科学研究和技术工作的科研人员和工程师阅读参考。

我们殷切希望本书的翻译和出版能够对我国的接触力学和摩擦学的教学和研究工作提供必要的借鉴和启发作用。我们在本书翻译过程中虽然已竭尽全力,但难免有错误和不妥之处,希望读者批评指正。

译 者

2011年9月

## 中文版第一版前言

接触和摩擦的概念所包含的内容远远多于人们对其的第一印象。接触和摩擦无处不在,并且对我们的日常生活和科技进步有着重要意义。这个概念除了狭义的摩擦外,还包含了从原子级到地壳尺度的磨损、润滑、黏着、毛细作用、流变学和系统动力学等,它不仅对现实应用非常重要,而且对应着一个让人着迷的世界。本书采用统一的、全局的观点来阐述接触力学和摩擦学的各个方面。

这本书最初的构想是作为教科书,所有的章节都配有习题,因此也可以作为一本参考书。我希望本书不仅对初学者有用,而且对从事摩擦学的研究人员也有所帮助。在这本书的写作中,我尽力约束自己,不是在描绘我个人的研究成果,而是接触力学和摩擦学领域的普遍知识,但最后3章即超声波对摩擦的影响、摩擦学中的数值仿真方法和地震动力学算是例外。

我很高兴在德文版和英文版之后,本书又有了中文版,这对我来说非常高兴和荣幸,因为自2003年起,我一直与中国的摩擦学专家保持着合作,其中包含了合作项目、摩擦学会议、学术交流和工业协会合作等。

对于这本书的翻译和审订工作,我衷心地感谢柏林工业大学的研究助理李强和清华大学的雒建斌教授。本书在英文版翻译过程中,我的同事Rainer Heise博士、Birthe Grzempa和Jasminka Starcevic博士给出了很多建议,因此,我也要感谢他们的帮助。



V. L. Popov

2011年8月于柏林



## 英文版第 2 版序言

与英文第 1 版的《接触力学与摩擦学的原理及其应用》相比,第 2 版增加了很多内容,主要集中在接触力学部分,如法向非黏着接触、法向黏着接触、切向接触和高弹性体接触问题等,在这些章节中添加了轴对称物体的接触求解以及应用举例。在磨损一章中增加了微动磨损的内容;在润滑一章中重新编写了弹流润滑一节,并增加了一些习题。另一个新的内容是接触力学中的数值仿真方法,补充了边界元法在切向接触和黏着接触中的应用。

在此,我要感谢 M. Hess 博士和 R. Pohrt 博士在内容编写中做出的贡献,感谢 M. Hess 和 M. Popov 对本书的订正,感谢 Wallendorf 女士的绘图,感谢 J. Starcevic 博士在整理完成时的支持。

V. L. Popov

2016 年 9 月于柏林

## 英文版第 1 版序言

呈现在您面前的是英文版《接触力学与摩擦学的原理及其应用》，多数内容是由相应的德文第 1 版翻译而来(Springer 出版, 2009)。本书增加了一章关于地震的摩擦问题。第 15 章补充了关于弹性流体的一节。另外, 在一些章节的“习题”部分增加了新的举例。

本书得到了 J. Gray 的大力支持, 是他将德语版翻译过来, 没有他, 这项工作是不可能完成的。我要感谢 G. G. Kocharyan 教授和 S. Sobolev 教授在地震动力学方面给出的重要建议和意见。R. Heise 博士对各章的习题解答和订正做出了重要贡献, 我真诚地感谢 J. Starcevic 博士在本书编写中的全力支持, 感谢 Ch. Koll 女士的绘图, 感谢 R. Heise, M. Popov, M. Heß, S. Kürscher 和 B. Grzemba 等人在校对中的帮助。

V. L. Popov

2009 年 11 月于柏林

## 德文版序言

对于希望能更好地了解接触力学和摩擦物理学的人来说,他会很快发现,没有任何一个领域比它更多元化,更吸引人,更让人兴奋。它涵盖的知识面非常广泛,如弹塑性理论、黏弹性理论、材料科学、流体力学(包括牛顿和非牛顿流体)、热动力学、电动力学、系统动力学等。接触力学和摩擦物理学的应用也十分广泛,从纳米领域的测量技术到地震的研究,几乎包括了工程摩擦的所有领域。学习了接触力学和摩擦物理学的人,能够对工程科学中不同的方法有一个全面的掌握。

本书的目的之一是清楚地阐述该领域的多个重要分支,并理清它们之间的关系。首先是接触力学的经典理论,包括黏着和毛细作用;接着是宏观摩擦理论、润滑、现代纳米摩擦学基础、摩擦机械的系统动力学(包括振动)、高弹性体摩擦、磨损等。在某些特定的情况下,这些领域之间的相互影响非常复杂。在实际中,摩擦学问题总是以不同的方式表现出来,没有一个简单的方法能解决摩擦学问题。唯一的通用方法就是我们必须先从摩擦学的观点了解这个系统。本书的另外一个目的就是讲述怎样了解这个系统。

作者一直坚信,机械接触和摩擦的本质通常比它们的表象要简单得多。如果一个人能够定性评估自己,他就可以理解机械接触和摩擦中很多不同层面的定性评估。因此,这本书很重视定性评估的方法。

分析计算中,我们采用了一些经典举例,像搭积木一样来理解和解决一系列现实问题。

摩擦学中很多的实际问题,尤其是摩擦系统的最优化问题,是很难得到解析解的。因此,本书对接触力学和摩擦的数值模拟方法进行了概述,并重点介绍了统一模型中在不同空间尺度中,若干个与接触力学有关的过程的综合方法。

这不仅是一本教科书,也可以作为这个领域的参考书。书中除了描述基本原理之外,还举了很多特别的例子,作为对应章节的习题。同时也提供了简单的习题解答。

这本书的基础来源于作者在柏林工业大学的教学讲义《接触力学与摩擦物理学》，所以这些材料能够在一或两个学期内完成学习。

本书的编写,得到了同事们的很大帮助。力学研究所“系统动力学和摩擦物理”的同事们对本书的完成做出了很多贡献,在此,我非常感谢 M. Schargott 博士、T. Geike 博士、M. Hess 先生和 J. Starcevic 博士。J. Starcevic 博士在本书编写中给了我全力的支持,M. Hess 先生仔细校对了所有公式,我要向他们表示诚挚的谢意。同时,我要感谢 Ch. Koll 女士为本书耐心的绘图,感谢 M. Popov 和 G. Putzar 博士的校对,感谢交通运输和机械系统的院长给我一个学期的时间来研究,使我能在此期间完成这本书。

V. L. Popov

2008 年 10 月于柏林

# 目录

第 1 章 绪论	1
1.1 接触和摩擦现象及其应用	1
1.2 接触力学和摩擦物理学的历史	3
1.3 本书的结构	7
第 2 章 接触问题的定性分析——无黏着法向接触	8
2.1 材料性能	9
2.2 简单接触问题	11
2.3 三维弹性连续体接触的评估计算方法	14
习题	17
第 3 章 黏着接触的定性分析	22
3.1 物理背景	23
3.2 曲面间黏着力计算	26
3.3 弹性体之间黏着力定性估计	27
3.4 粗糙度对黏着的影响	28
3.5 胶带	29
3.6 范德华力和表面能的补充内容	30
习题	31
第 4 章 毛细作用力	35
4.1 表面张力和接触角	36
4.2 接触角滞后	38
4.3 压力和曲率半径	38
4.4 毛细桥梁	39
4.5 刚性平面和刚性球体之间的毛细力	40
4.6 粗糙表面的液体	40
4.7 毛细力和摩擦学	41
习题	42

<b>第 5 章 接触问题的精确解法——赫兹接触</b> .....	46
5.1 表面力作用下弹性半空间体的变形 .....	47
5.2 赫兹接触理论 .....	49
5.3 两个曲面弹性体之间的接触 .....	51
5.4 刚性锥头和弹性半空间体的接触 .....	53
5.5 赫兹接触的内部应力 .....	54
5.6 降维法 .....	56
习题 .....	58
<b>第 6 章 接触问题的精确解法——黏着接触</b> .....	67
6.1 概述 .....	68
6.2 旋转轴对称物体的黏着接触 .....	72
习题 .....	74
<b>第 7 章 粗糙表面之间的接触</b> .....	78
7.1 Greenwood 和 Williamson 模型 .....	79
7.2 微凸体的塑性变形 .....	83
7.3 电接触 .....	84
7.4 热接触 .....	86
7.5 接触机械刚度 .....	87
7.6 密封 .....	87
7.7 粗糙度和黏着 .....	88
习题 .....	89
<b>第 8 章 切向接触问题</b> .....	94
8.1 切向力作用下弹性半空间体的变形 .....	95
8.2 分布切向力作用下弹性半空间体的变形 .....	95
8.3 无滑动切向接触问题 .....	97
8.4 考虑滑动的切向接触问题 .....	98
8.5 无滑动刚性圆柱压头 .....	100
8.6 轴对称物体的切向接触 .....	101
习题 .....	104
<b>第 9 章 滚动接触</b> .....	109
9.1 滚动接触过程的定性讨论 .....	110
9.2 平稳滚动接触的应力分布 .....	112
习题 .....	116

<b>第 10 章 库仑摩擦定律</b> .....	120
10.1 概述 .....	120
10.2 静摩擦与动摩擦 .....	121
10.3 摩擦角 .....	122
10.4 摩擦系数与接触时间的关系 .....	122
10.5 摩擦系数与法向力的关系 .....	124
10.6 摩擦系数与滑动速度的关系 .....	125
10.7 摩擦系数与表面粗糙度的关系 .....	125
10.8 库仑对摩擦定理起源的观点 .....	126
10.9 Bowden 和 Tabor 理论 .....	127
10.10 摩擦系数与温度的关系 .....	129
习题 .....	130
<b>第 11 章 Prandtl-Tomlinson 干摩擦模型</b> .....	138
11.1 概述 .....	138
11.2 Prandtl-Tomlinson 模型的基本性质 .....	140
11.3 弹性失稳 .....	143
11.4 超滑 .....	146
11.5 纳米机械: 微电机与纳米电机的概念 .....	146
习题 .....	150
<b>第 12 章 摩擦引起的振动</b> .....	153
12.1 摩擦力与速度为减函数关系时的摩擦失稳 .....	154
12.2 有弹性力分布的系统中的失稳 .....	156
12.3 临界阻尼和尖叫声的最优化抑制 .....	158
12.4 主动抑制尖叫声 .....	159
12.5 尖叫时的强度 .....	161
12.6 稳定性标准与系统刚度的关系 .....	162
12.7 自锁-滑动 .....	165
习题 .....	167
<b>第 13 章 接触中的热效应</b> .....	171
13.1 概述 .....	172
13.2 微接触中的瞬现温度 .....	172
13.3 热机械的失稳 .....	174
习题 .....	175

<b>第 14 章 润滑系统</b> .....	177
14.1 两个平行面之间的流动 .....	178
14.2 流体动力润滑 .....	179
14.3 黏性黏着 .....	182
14.4 润滑剂流变学 .....	184
14.5 边界层润滑 .....	186
14.6 弹性流体动力学 .....	186
14.7 固体润滑剂 .....	189
习题 .....	190
<b>第 15 章 高弹性体的黏弹性能</b> .....	200
15.1 概述 .....	200
15.2 应力弛豫 .....	201
15.3 频率相关的复数剪切模量 .....	202
15.4 复模量的性质 .....	204
15.5 黏弹性材料中的能量耗散 .....	205
15.6 复模量的测量 .....	206
15.7 流变学模型 .....	207
15.8 橡胶的简单流变学模型(标准模型) .....	209
15.9 温度对流变学性能的影响 .....	210
15.10 组合曲线 .....	211
15.11 Prony 级数 .....	212
15.12 降维法在黏弹性接触中的应用 .....	215
习题 .....	216
<b>第 16 章 橡胶摩擦和橡胶接触力学</b> .....	222
16.1 高弹性体和刚性粗糙面之间的摩擦 .....	223
16.2 滚动阻力 .....	227
16.3 高弹性体的黏着接触 .....	229
习题 .....	231
<b>第 17 章 磨损</b> .....	235
17.1 概述 .....	235
17.2 磨粒磨损 .....	236
17.3 黏着磨损 .....	239
17.4 低摩擦磨损的条件 .....	241



17.5	磨损作为摩擦区材料的运输工具 .....	242
17.6	高弹性体的磨损 .....	243
	习题 .....	245
<b>第 18 章</b>	<b>超声振动影响下的摩擦行为 .....</b>	<b>249</b>
18.1	超声振动在宏观角度对摩擦的影响 .....	250
18.2	超声振动在微观角度对摩擦的影响 .....	254
18.3	静摩擦力与振幅函数关系的实验研究 .....	256
18.4	动摩擦力与振幅函数关系的实验研究 .....	258
	习题 .....	259
<b>第 19 章</b>	<b>摩擦物理学中的数值仿真方法 .....</b>	<b>264</b>
19.1	多体系统 .....	265
19.2	有限元法 .....	265
19.3	边界元法 .....	266
19.4	边界元法-切向接触 .....	268
19.5	边界元法-黏着接触 .....	269
19.6	粒子法 .....	270
19.7	降维法 .....	270
<b>第 20 章</b>	<b>地震与摩擦 .....</b>	<b>271</b>
20.1	概述 .....	272
20.2	地震的量化 .....	273
20.3	岩石的摩擦定律 .....	275
20.4	在速率相关和状态相关摩擦下滑动的稳定性 .....	277
20.5	地震成核和后期滑动 .....	280
20.6	前震和余震 .....	283
20.7	块介质和断层结构的连续介质力学 .....	283
20.8	地震可以预测吗 .....	286
	习题 .....	287
附录 A	应力分布作用下的法向位移 .....	290
附录 B	表面轴对称物体的法向接触 .....	294
附录 C	表面轴对称物体的黏着接触 .....	297
附录 D	表面轴对称物体的切向接触 .....	299
	扩展阅读文献 .....	301
	各章压题图片说明 .....	308
	索引 .....	310